β-丙氨酸的生理功能及其在动物生产中的应用

齐　博　武书庚　王　晶　齐广海　张海军*

（中国农业科学院饲料研究所，农业部饲料生物技术重点开放试验室，生物饲料开发国家工程研究中心，北京 100081）

摘　要：β-丙氨酸是一种不参与蛋白质合成的氨基酸，为肌肽、鹅肌肽等肌源活性肽合成的前体物，作为增强肌肉耐力的运动营养补充剂已经广泛应用于临床营养。研究表明，β-丙氨酸可提高动物生产性能，调控肌肉生长和肌源活性肽含量，改善肉品质量。本文旨在对 β-丙氨酸的来源和代谢，生理功能及在动物生产领域的应用进行综述，为 β-丙氨酸在动物营养调控和生产实践中的应用提供理论依据。

关键词：β-丙氨酸；肌源活性肽；生理功能；动物生产

中图分类号：S816.7　　　　文献标识码：　　　　　文章编号：

随着经济的快速发展，人民生活水平不断提高，对肉制品的品质要求逐年提高，消费者不仅关注肉制品的营养特性，对其维护健康的功能特性也提出了更高要求。目前，肉制品的开发还处于初级阶段，新型品种较少，因此，开发功能性肉制品对于肉类食品发展具有重要的意义。肉、蛋、奶是人类主要的动物蛋白质来源，肉类中特别是禽肉中含有丰富的功能性肽—咪唑二肽（肌肽及其衍生物鹅肌肽）[1]。β-丙氨酸是最简单的 β 型氨基酸，是人和哺乳动物内源咪唑二肽合成的限制性氨基酸[2-4]，具有增加肌肉中咪唑二肽含量、提高抗氧化能

收稿日期：2015-10-26

基金项目：家禽产业技术体系北京市创新团队（CARS-PSTP）

作者简介：齐　博(1991-)，男，陕西西安人，硕士研究生，从事单胃动物营养。E-mail: qibohuhu@163.com

*通信作者：张海军，副研究员，硕士生导师，E-mail: fowlfeed@163.com

力、增强肌肉的缓冲能力和抗疲劳等作用[3,5]。近年来随着生产成本的降低，人们开始研究β-丙氨酸在动物生产中的应用。已有研究表明，畜禽生产中合理利用β-丙氨酸，可以调节肌肉生长、改善动物产品品质[6]。本文就β-丙氨酸的来源和代谢、生理功能及其在动物生产实践中的应用进行综述，为β-丙氨酸在动物生产中的应用提供理论依据和参考。

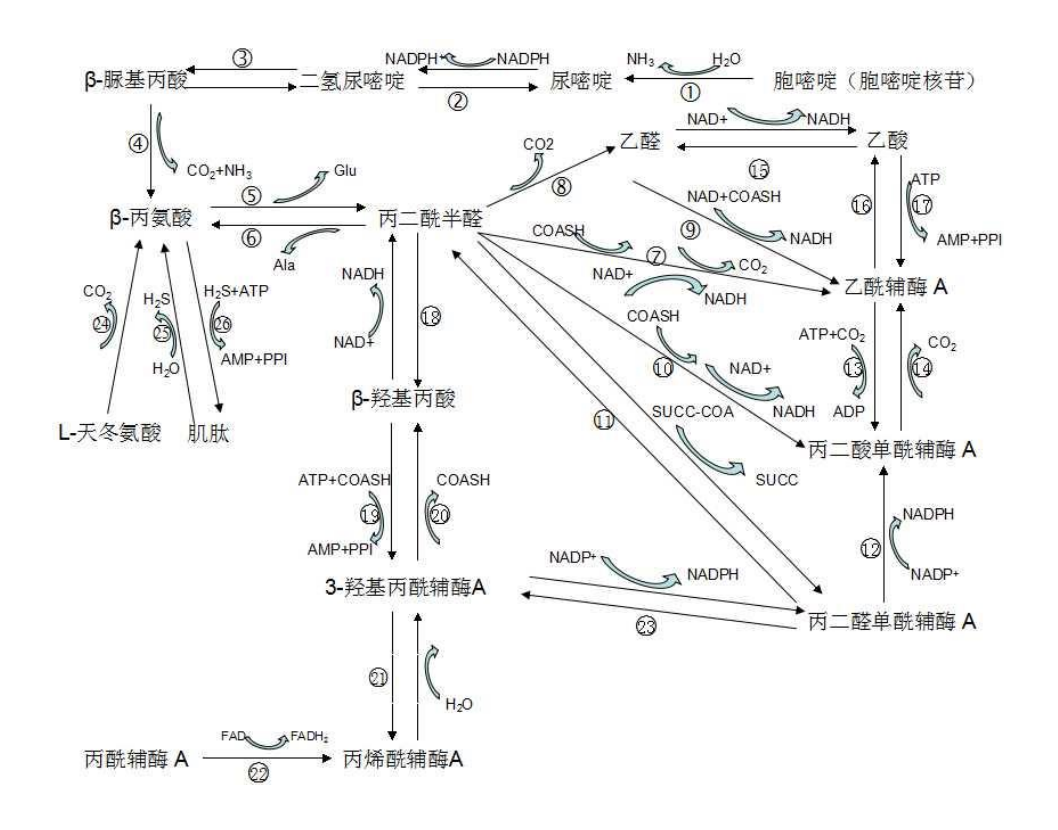
1 β-丙氨酸的来源和代谢

β-丙氨酸是自然界中存在的唯一一种β-型氨基酸，不参与蛋白质的合成，不仅是尿嘧啶和胞嘧啶的分解代谢产物，还是组成泛酸、辅酶 A 等的成分，与组氨酸等结合形成肌肽及其衍生物鹅肌肽（存在于动物肌肉中）。β-丙氨酸在豆科植物的根瘤、茶叶、哺乳类的脑水解物中以游离状态存在。天冬氨酸在细菌天冬氨酸脱羧酶的作用下脱羧可生成β-丙氨酸。

1.1 来源

动物体内的β-丙氨酸主要来源于肝脏，以尿嘧啶和胞嘧啶的分解、肌肽的水解、*L*-天冬氨酸的脱羧 3 种方式为主（图 1），其中主要来源于嘧啶的分解。

β-丙氨酸还可通过化学合成法[7]和微生物转化法[8]合成。化学合成法主要有丙烯腈氨化水解法，丙烯酸经氨化生成β-氨基丙腈，在酸性或碱性环境下水解产生β-丙氨酸；但该工艺会产生大量无机盐，产品纯度较低，产量少。微生物转化法生产β-丙氨酸，利用大肠杆菌和谷氨酸棒杆菌，*L*-天冬氨酸α-脱羧酶基因重组表达，重组酶可转化*L*-天冬氨酸生成β-丙氨酸，分批加入底物进行转化，当酶量为 3 000 U/g 时，100 g/L 的*L*-天冬氨酸底物转化率达 97.8%；此过程设备简单、条件温和、副产物少、便于纯化，产量多，具备工业化生产的要求，正在得到越来越多的应用。



①：环胞嘧啶脱氨酶 cytosine ring deaminase；②：二氢嘧啶脱氢酶 dihydrouracil dehydrogenase；③：二氢嘧啶酶 dihydropyrimidinase；④：β-尿酰丙酸酶 β-ureidopropionase；⑤：酮戊二酸转氨酶 β-alanine-α-ketoglutarate transaminase；⑥：β-丙酮酸转氨酶 β-alanine-pyruvate transaminase；⑦：丙醛酸脱氢酶 malonate semialdehyde dehydrogenase；⑧：丙醛酸脱羧酶 malonate semialdehyde decarboxylase；⑨：乙醛脱氢酶 acetaldehyde dehydrogenase；⑩：乙醛脱氢酶 acetaldehyde dehydrogenase；⑪琥珀酸乙酰辅酶 A 转移酶 succinyl-acetoacetyl-CoA transferase；⑫：丙二酸半醛脱氢酶 malonate semialdehyde dehydrogenase；⑬：乙酰辅酶 A 羧化酶 acetyl-CoA carboxylase；⑭：丙二酸单酰辅酶 A 羧化酶 malonyl-CoA carboxylase；⑮：乙醛脱氢酶 aldehyde dehydrogenase；⑯乙酰辅酶 A 水解酶 acetyl-CoA hydrolase；⑰：乙酰辅酶 A 合成酶 acetyl-CoA synthetase；⑱：3-乳酸乙酯脱氢酶 3-hydroxypropionate dehydrogenase；⑲：乙酰辅酶 A 合成酶 acetyl-CoA synthetase；⑳：3-乳酸乙酯脱氢酶 3-hydroxypropionate dehydrogenase；㉑：烯酰水合酶 enovl-CoA hydratase；

㉒：丁酰辅酶 A 脱氢酶 butvrvl-CoA dehvdrogenase；㉓：丙酰辅酶 A 还原酶 propionyl-CoA reductase；㉔：*L*-天冬氨酸 α-丙氨酸转氨酶 *L*-aspartic acid-α-alanine transaminase；㉕：肌肽分解酶 arnosine lytic enzyme；㉖：肌肽合成酶 carnosine synthetase。

图 1 动物体内 β-丙氨酸的生成和代谢

Fig.1 Formation and metabolism pathway of β-alanine *in vivo*

1.2 代谢

β-丙氨酸的代谢主要在大脑和肌肉中，代谢的初级产物为丙二酰半醛（malonate semialdehyde，MS），正常代谢时最终产物为乙酸[9]。

肝脏中合成的 β-丙氨酸，通过牛磺酸转运体（taurine transporter，TauT）和质子耦合氨基酸转运体（proton coupling amino acid transporter，PAT1）转运以及血液循环到达组织器官，在酶的作用下产生肌肽及 MS 发挥相应的作用。由图 1 可以看出，MS 可直接产生乙酰辅酶 A 或脱羧生成乙醛。研究表明，β-丙氨酸在动物体内主要依靠咪唑二肽发挥作用，咪唑二肽具有缓冲肌肉 pH、抗疲劳、抗氧化、改善记忆功能等生物学作用[10-13]。表 1 为不同种类动物产品中咪唑二肽含量。可见，在肉制品中，家禽胸肌中咪唑二肽含量较高。

表 1 动物产品中咪唑二肽的含量

Table 1 The content of imidazole dipeptide in animal products[1] μmol/g

动物组织 Animal tissue	咪唑二肽 Imidazole dipeptide	动物组织 Animal tissue	咪唑二肽 Imidazole dipeptide
白鲸骨骼肌 Skeletal muscle of little pinked Whale	68.8	猪腰肌 Psoas muscle of pig	23.3
火鸡胸小肌 Turkey (*pectoralis minor*)	58.0	鸡腿肌 Leg muscle of chicken	22.9

鸡胸小肌 Chicken (*pectoralis minor*)	43.5	鹿腿肌 Leg muscle of Deer	21.2
马腿肌 Leg muscle of horse	42.8	牛股二头肌 Ox (*biceps femoris*)	18.3
猪腿肌 Leg muscle of Pig	32.7	猪股二头肌 Pig (*biceps femoris*)	15.4
牛腿肌 Leg muscle of Ox	32.1	鲤鱼白肌 White muscle of Carp	11.8
火鸡腿肌 Leg muscle of Turkey	25.1		

2 β-丙氨酸的生理功能

β-丙氨酸是咪唑二肽合成的唯一限制性氨基酸，是一种潜在的功能性氨基酸。目前发现，β-丙氨酸具有多种生理功能：作为神经递质或者激素调节器，调控体内新陈代谢；作为多种活性物质（辅酶 A 和泛酸等）的中间代谢物；对抗疲劳，提高机体的运动能力；改善记忆，抗衰老等作用。因其多种生理功能，β-丙氨酸已经引起了人们的广泛关注。

2.1 作为神经递质

在哺乳动物神经系统中，β-丙氨酸作为大脑神经递质，可以合成神经系统二肽（肌肽、鹅肌肽）。有研究表明，在骶髓后连合核膜（the sacral dorsal commissural nucleus，SDCN）上，β-丙氨酸能够激活调控氯离子通道的系统[2]，可作为一种活化士的宁敏感的甘氨酸受体[14]。体外试验表明，β-丙氨酸作为一种神经调节物质，能够激活 γ-氨基丁酸 A 型受体和甘氨酸受体，这两种受体是孕酮或类固醇激素的重要调节器，调控机体代谢[15]。β-丙氨酸还可作为铅解毒剂，其解毒机制可能与神经递质功能有关[16]。

2.2 作为活性物质中间代谢物

β-丙氨酸是多种活性物质的关键中间体。植物和微生物都能自行合成泛酸，但是动物却不能自行合成，外源添加 β-丙氨酸能够促进泛酸和辅酶 A 的形成[17]。在促进昆虫色素的形成时，β-丙氨酰多巴胺合成酶（N-β-alanyldopamine synthase，BAS）将 β-丙氨酸转移至多巴胺形成 N-β-丙氨酰多巴胺（N-β-alanyldopamine，NBAD），减少黑色素在体表的沉积，从

而改变昆虫外壳颜色，NBAD 为凤蝶翅膀黄色色素的主要成分[18]。另外，N-β-丙氨酰去甲肾上腺素（N-beta-alanylnorepinephrine，NBANE）和 NBAD 是节肢动物壳质骨化的前体，β-丙氨酸是合成 NBANE 和 NBAD 的底物[19]，能促进动物壳质骨化。

2.3 增强运动能力，对抗疲劳

β-丙氨酸可作为肌肽（肌肉缓冲剂）合成的前体物，是极少数具有科学依据的运动增强剂，已广泛应用于临床研究[20]。肌肽可作为肌肉中非碳酸盐型的质子缓冲剂，减少高强度运动引起的骨骼肌酸中毒，但缓冲时间可能有限[21]。临床研究表明，年轻志愿者连续 23 d 每天服用 β-丙氨酸 6.4 g，肌肽含量显著升高[22-23]；相关研究也表明，补充 β-丙氨酸对于 60 s 以内的运动无效果，对 60～240 s 的运动有强大的正面效果，对于 240 s 以上的运动效果更加明显[24]。β-丙氨酸作为膳食补充剂具有抗疲劳的效果，目前每年约有 100 t 的 β-丙氨酸作为膳食补充剂[25]。大学生足球运动员连续 30 d 服用 β-丙氨酸 4.5 g/d，其主观疲劳感明显降低，表明 β-丙氨酸能够缓解疲劳尤其是高强度无氧运动疲劳[20]。β-丙氨酸还能提高运动员内分泌激素量，提高训练总量和耐受能力，阻力训练后立即、15 min 和 30 min 后补充 β-丙氨酸（4.8 g/d），结果表明，立即和 15 min 后补充 β-丙氨酸可使生长激素含量显著增加，所有补充 β-丙氨酸组皮质酮含量均显著增加[26]。

2.4 其他作用

β-丙氨酸能够影响昆虫体内抗寒机制，调控机体温度[19]；具有改善记忆的能力；对老人有一些潜在的健康益处，比如抗衰老等作用[27]。

3 β-丙氨酸在动物生产中的应用

β-丙氨酸可提高动物饲料转化率，从而提高生产性能；增加肌肉中肌源活性肽的含量，提高肌肉抗氧化能力，改善肉品质，增加体内牛磺酸的消耗。

3.1 提高生产性能

目前 β-丙氨酸对动物生产性能影响的报道结果并不一致。在家禽上的研究稍多，但其

确切影响尚无定论。有研究表明，2 日龄肉仔鸡每天口服 β-丙氨酸（22 mmol/kg）2 次，连续 5 d，可降低采食量，提高饲料效率[28]，但随后类似的剂量反应试验中，连续 5 d 给 2 日龄肉鸡口服 0.176、0.880、4.400、22.000 mmol/kg 的 β-丙氨酸对生产性能无任何影响[29]。早期的研究发现饲粮中添加 2.5%的 β-丙氨酸可显著降低肉仔鸡的采食量，提高饲料效率[8]；4 周龄肉仔鸡饲喂添加 1%和 2%的 β-丙氨酸的饲粮 4 周，体增重显著降低，且 2%的 β-丙氨酸组采食量显著降低，但饲料效率无显著变化[30]。研究也表明，饲料中添加 500 mg/kg 的 β-丙氨酸有提高鲤鱼体增重和饲料转化率的趋势[31]；饲粮添加 1.2%的 β-丙氨酸对小鼠的生产性能无显著影响[32]；饲粮添加 0.225%的 β-丙氨酸对猪的生产性能无显著影响[33]。β-丙氨酸能提高动物生产性能可能是由于 β-丙氨酸可作为神经递质调节生长激素的分泌进而调控动物生长，但也受动物种类、饲养管理方式、环境以及采食 β-丙氨酸方式等影响。因此，β-丙氨酸对动物生产性能的影响还有待深入研究。

3.2 调控肌肉中咪唑二肽含量

肌肽是一种内源功能性二肽，主要存在于骨骼肌和胸肌中[34]，具有稳定细胞内 pH、抑制脂质过氧化、清除自由基、调节 Ca^{2+}等生物活性。研究表明，饲粮中添加 0.5%的 β-丙氨酸，可提高肉仔鸡腿肌肌肽含量 45%，添加 1%可提高胸肌肌肽含量 20%[35]。通过饮水补充 β-丙氨酸（1.2%），小鼠胫骨前肌中肌肽含量提高了 160%（6.47 mmol/kg vs. 2.48 mmol/kg），而直接补充高剂量肌肽（1.8%）组胫骨前肌中肌肽含量仅提高了 30%（3.22 mmol/kg vs. 2.48 mmol/kg），说明饮水中添加 β-丙氨酸提高肌肽的效果远远好于饮水中直接添加肌肽[32]。Tomonaga 等[29-30]研究表明，摄取 β-丙氨酸的方式（饮水或采食）可能会对组织中肌肽含量产生一定的影响，肌肽含量增加可能是由于体内组氨酸含量较多，合成肌肽的速率主要受 β-丙氨酸影响，外源添加 β-丙氨酸有利于提高肌肽合成酶 Km 值，增加肌肽含量。新近研究表明，饲喂 β-丙氨酸的肉仔鸡肌肉咪唑二肽含量显著提高，并且其肌肉在加热处理后，鹅肌肽浓度可增加 1 倍[36]。以上结果提示，饲喂 β-丙氨酸调控动物肌肉中咪唑二肽含量可在

肌肉脱离机体后仍进一步发挥作用，具体机制有待深入研究。

肌肽含量因性别、组织器官不同而不同，摄入相同的丙氨酸，雄性动物胸肌中肌肽含量提高的比例比雌性动物高[37-38]; 1%和 2%的 β-丙氨酸能显著提高肉仔鸡脑中肌肽和鹅肌肽含量，对浅胸肌、深胸肌、股二头肌中肌肽和鹅肌肽含量无显著影响[29]。β-丙氨酸可促进鲤鱼生长，但不影响肌肽和鹅肌肽含量，原因可能是鱼类对肌肽的储存少，不敏感[31]。β-丙氨酸转运体 *TauT*、*PAT*1 等基因的表达以及不同动物对肌肽的敏感程度不同都会影响肌肽的合成过程。

有研究表明，在对抗大鼠因高脂饲粮引起的炎症反应或代谢应激方面发挥作用的是血浆肌肽而不是肌肉肌肽[39]；人在摄入纯肌肽、牛肉、鸡肉或鸡汤后，血浆中均检测不到肌肽，而血浆鹅肌肽显著升高，尿中肌肽和鹅肌肽含量增加数 10 倍，表明摄入的咪唑二肽在血浆中被肌肽酶快速代谢，经尿液排出体外[40]。可见，机体不同部位咪唑二肽含量和比例不同。动物采食 β-丙氨酸后，血液、肝脏、肌肉等组织器官中咪唑二肽的代谢路径和关键产物有待深入研究，这也是揭示 β-丙氨酸功能组织器官特异性的基础。因此，β-丙氨酸对不同动物体内咪唑二肽含量的影响还需深入研究。

3.3 改善肌肉品质

β-丙氨酸可以提高肌纤维密度和肌肉嫩度，减小肌纤维直径，降低肌肉剪切力，减轻脂肪氧化和应激作用，改善肌肉品质。研究表明，饲粮中添加 0.12%的 β-丙氨酸，显著提高肉仔鸡胸肌中慢肌和快红肌肌球蛋白重链基因 mRNA 的相对表达量，显著降低快白肌肌球蛋白基因 mRNA 的相对表达量，显著增加 42 d 腿肌纤维密度，减小肌纤维面积和肌纤维直径[41]；β-丙氨酸（2%）还能提高肉仔鸡腿肌中慢速氧化型纤维/快速氧化型纤维比例，提高肌肉嫩度，调控肌肉生长[6]；1%的 β-丙氨酸可降低胸肌剪切力和亮度（lightness，L*）值，肌肽浓度的增加可使钙蛋白酶活化加快，从而加快肌肉熟化，提高肌肉嫩度，改善肉质[42]。

有报道指出 β-丙氨酸与 β-羟基-β-甲基丁酸联合应用可降低老龄、久坐大鼠肌肉蛋白降解，虽对肌肉功能无显著改善，但不排除在极端条件下的有效性[43]。β-丙氨酸与其他调节肌肉代谢的营养补充剂（肌酸、β-羟基-β-甲基丁酸、N-氨甲酰谷氨酸等）在增加肉用动物肌肉产量和改善肌肉品质方面的协同作用及机理，可作为提高肉用畜禽产品品质的有效途径来系统研究。

3.4 提高肌肉抗氧化能力

β-丙氨酸能提高肌肽含量，减轻肌肉中脂质过氧化，提高肌肉抗氧化能力。小鼠上的研究表明，β-丙氨酸能提高腓肠肌中超氧化物歧化酶（SOD）、谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）活性，降低丙二醛（MDA）含量，提高骨骼肌的抗氧化能力[44]。研究也表明，肉仔鸡饲粮中添加 0.12%的 β-丙氨酸能显著降低 42 日龄胸肌 MDA 含量，提高 GSH-Px 活性[41]；β-丙氨酸（0.5%、1.0%）有降低肉仔鸡胸肌 MDA 含量的趋势[37]；β-丙氨酸能提高肌肉中肌肽含量，减缓脂肪氧化和降低饲养过程产生的应激，提高机体的抗氧化能力[45]。可见，β-丙氨酸能提高肌肉的抗氧化能力。

3.5 增加体内牛磺酸的消耗

牛磺酸是一种含硫氨基酸，在体内以游离的形式存在，不直接参与蛋白质合成，但与体内氨基酸代谢有关，因为在吸收代谢方面存在竞争关系，β-丙氨酸能引起牛磺酸的消耗[26，46]。给小鼠注射 β-丙氨酸，可引起小鼠脑和肌肉中牛磺酸的消耗[46-47]，β-丙氨酸作为牛磺酸抑制剂能够增加机体牛磺酸消耗，但是以上研究均未发现动物健康状况发生变化。

有研究表明 β-丙氨酸能阻碍牛磺酸的摄取，减轻对 Ca^{2+}的调节作用[48]，这可能与牛磺酸转运体（能够同时转运 β-丙氨酸和牛磺酸）的争夺有关。神经生物学的研究表明，β-丙氨酸和 γ-氨基丁酸（GABA）可共用转运体[49-50]，因此 β-丙氨酸可能对 GABA 的功能与摄食调控作用产生影响，但目前尚无相关动物试验研究结果。在今后的研究中，我们可以利用系统生物学的方法来研究 β-丙氨酸对动物组织尤其是神经组织牛磺酸和 GABA 的影响及其作

用机制。

4 小结

综上所述，β-丙氨酸可调控肌肉代谢，提高肌肉抗氧化能力，改善肉品质，具有应用于动物生产的良好潜力。目前有关 β-丙氨酸在动物生产中作用机制的研究较少，尚需在以下几方面进一步开展系统和深入研究：①不同动物饲粮中 β-丙氨酸的适宜添加剂量，目前 β-丙氨酸作为饲料添加剂的研究尚不充分，如增加肉鸡肌肽含量的剂量范围尚无定论；②β-丙氨酸在机体不同部位发挥作用的途径和机制；③应激或逆境条件下 β-丙氨酸对畜禽的作用及其机制；④β-丙氨酸与其他肌肉营养补充剂混合应用调控动物肌肉代谢的效果。可见，β-丙氨酸在动物生产中的合理应用、实用化技术以及通过肌肽在动物机体中发挥作用的机制还有待进一步研究和探索。随着人们对 β-丙氨酸作用机制认识的逐渐深入，β-丙氨酸在饲料工业和动物生产领域将会发挥更大的作用。

参考文献：

[1] ABE H.Role of histidine-related compounds as intracellular proton buffering constituents in vertebrate muscle (review)[J].Biochemistry (Mosc),2000,65(7):757–765.

[2] BAKARDJIEV A,BAUER K.Transport of β-alanine and biosynthesis of carnosine by skeletal muscle cells in primary culture[J].European Journal of Biochemistry,1994,225(2):617–623.

[3] DUNNET M,HARRIS R C.Influence of oral beta-alanine and *L*-histidine supplementation on the carnosine content of the gluteus medius[J].Equine Veterinary Journay,1999,31(S30):499–504.

[4] HARRIS R C,TALLON M J,DUNNETT M,et al.The absorption of orally supplied β-alanine and its effect on muscle carnosine synthesis in human vastus lateralis[J].Amino Acids,2006,30(3):279–289.

[5] HILL C A,HARRIS R C,KIM H J,et al.Influence of beta-alanine supplementation on skeletal muscle carnosine concentrations and high intensity cycling capacity[J].Amino Acids.2007,32(2):225–233.

[6] 张国强.日粮肌苷酸、β-丙氨酸和组氨酸对肉鸡肉品质的营养调控[D].博士学位论文.北京:中国农业大学,2008.

[7] 罗积杏,薛建萍,沈寅初.β-氨基丙酸的合成与应用[J].氨基酸和生物资源,2005,27(1):52–55.

[8] 赵连真.酶转化法合成β-丙氨酸关键基因的重组表达及转化研究[D].硕士学位论文.无锡:江南大学,2013.

[9] GRIFFITH O W.β-amino acids:mammalian metabolism and utility as α-amino acid analogues[J].Annual Review of Biochemistry,1986,55(1):855–878.

[10] JACOB J P,BLAIR R,HART L E,et al.The effect of taurine transport antagonists on cardiac taurine concentration and the incidence of sudden death syndrome in male broiler chickens[J].Poultry Science,1991,70(3):561–567.

[11] HARRIS R C,MARLIN D J,DUNNETT M,et al.Muscle buffering capacity and dipeptide content in the thoroughbred horse,greyhound dog and man[J].Comparative Biochemistry and Physiology Part A:Physiology,1990,97(2):249–251.

[12] GALLANT S,SEMYONOVA M,YUNEVA M.Carnosine as a potential anti-senescence drug[J].Biochemistry,2000,65(7):866–868.

[13] DJENANE D,MARTÍNEZ L,SÁNCHEZ-ESCALANTE A,et al.Antioxidant effect of carnosine and carnitine in fresh beef steaks stored under modified atmosphere[J].Food Chemistry,2004,85(3):453–459.

[14] WANG D S,ZHU H L,LI J S.β-alanine acts on glycine receptors in the rat sacral dorsal commissural neurons[J].International Journal of Neuroscience,2003,113(3):293–305.

[15] WU F S,GIBBS T T,FARB D H.Dual activation of $GABA_A$ and glycine receptors by β-alanine:inverse modulation by progesterone and 5α-pregnan-3α-ol-20-one[J].European Journal of Pharmacology,1993,246(3):239–246.

[16] EL-WASSEF A.Beta-alanine as lead antidote[J].Oriental Journal of Chemistry,1988,4(1):102–103.

[17] WHITE W H,GUNYUZLU P L,TOYN J H.*Saccharomyces cerevisiae* is capable of de *Novo* pantothenic acid biosynthesis involving a novel pathway of β-alanine production from spermine[J].Journal of Biological Chemistry,2001,276(14):10794–10800.

[18] KOCH P B,BEHNECKE B,WEIGMANN-LENZ M,et al.Insect pigmentation:activities of beta-alanyldopamine synthase in wing color patterns of wild-type and melanic mutant swallowtail butterfly *Papilio glaucus*[J].Pigment Cell Research,2000,13(Suppl.8):54–58.

[19] 王晓燕.β-丙氨酸对甜菜夜蛾生长发育及体内酶活性的影响[D].硕士学位论文.武汉:华中农业大学,2010.

[20] HOFFMAN J R,RATAMESS N A,FAIGENBAUM A D,et al.Short-duration β-alanine supplementation increases training volume and reduces subjective feelings of fatigue in college football players[J].Nutrition Research,2008,28(1):31–35.

[21] 孙景权,叶碧璇,周海涛,等.天然 β-丙氨酸提高运动能力及其机制的研究进展[J].中国食物与营养,2015,21(6):64–68.

[22] SHAFFER J E,KOCSIS J J.Taurine mobilizing effects of beta alanine and other inhibitors of taurine transport[J].Life Science,1981,28(24):2727–2736.

[23] BEX T,CHUNG W,BAGUET A,et al.Muscle carnosine loading by beta-alanine supplementation is more pronounced in trained vs. untrained muscles[J].Journal of Applied Physiology,2014,116(2):204–209.

[24] HOBSON R M,SAUNDERS B,BALL G,et al.Effects of β-alanine supplementation on exercise performance:a meta-analysis[J].Amino Acids,2012,43(1):25–37.

[25] SALE C,ARTIOLI G G,GUALANO B,et al.Carnosine:from exercise performance to health[J].Amino Acids,2013,44(6):1477–1491.

[26] HOFFMAN J,RATAMESS N A,ROSS R,et al.β-alanine and the hormonal response to exercise[J].International Journal of Sports Medicine,2008,29(12):952–958.

[27] TOMONAGA S,KAJI Y,TACHIBANA T,et al.Oral administration of β-alanine modifies carnosine concentrations in the muscles and brains of chickens[J].Animal Science Journal,2005,76(3):249–254.

[28] HOFFMAN J R,EMERSON N S,STOUT J R.β-Alanine supplementation[J].Current Sports Medicine Reports,2012,11(4):189–195.

[29] TOMONAGA S,MATSUMOTO M,FURUSE M.β-alanine enhances brain and muscle carnosine levels in broiler chicks[J].Journal of Poultry Science,2012,49(4):308–312.

[30] TOMONAGA S,KANEKO K,KAJI Y,et al.Dietary β-alanine enhances brain,but not muscle,carnosine and anserine concentrations in broilers[J].Animal Science Journal,2006,77(1):79–86.

[31] GEDA F,DECLERCQ A,DECOSTERE A,et al.β-Alanine does not act through branched-chain amino acid catabolism in carp,a species with low muscular carnosine storage[J].Fish Physiology and Biochemistry,2014,41(1):281–287.

[32] EVERAERT I,STEGEN S,VANHEEL B,et al.Effect of beta-alanine and carnosine supplementation on muscle contractility in mice[J].Medicine & Science in Sports & Exercise,2013,45(1):43–51.

[33] MEI L ,CROMWELL G L,CRUM A D,et al.Influence of dietary β-alanine and histidine on the oxidative stability of pork[J].Meat Science,1998,49(1):55–64.

[34] ARISTOY M C,TOLDRÁ F.Histidine dipeptides HPLC-based test for the detection of mammalian origin proteins in feeds for ruminants[J].Meat Science,2004,67(2):211–217.

[35] KRALIK G,SAK-BOSNAR M,KRALIK Z,et al.Effects of β-alanine dietary supplementation on concentration of carnosine and quality of broiler muscle tissue[J].Journal of Poultry Science,2014,51(2):151–156.

[36] ŁUKASIEWICZ M,PUPPLEL K,KUCZYŃSKA B,et al.β-Alanine as a factor influencing the content of bioactive dipeptides in muscles of Hubbard Flex chickens[J].Journal of the Science of Food and Agriculture,2015,95(12):2562–2565.

[37] INTARAPICHET K O,MAIKHUNTHOD B.Genotype and gender differences in carnosine extracts and antioxidant activities of chicken breast and thigh meats[J].Meat Science,2005,71(4):634–642.

[38] 胡新旭.日粮肌肽、β-丙氨酸和黄芪多糖对肉鸡肉品质的营养调控[D].博士学位论文.北京:中国农业大学,2009.

[39] STEGEN S,STEGEN B,ALDINI G,et al.Plasma carnosine,but not muscle carnosine,attenuates high-fat diet-induced metabolic stress[J].Applied Physiology,Nutrition,and Metabolism,2015,40(9):868–876.

[40] YEUM K J,ORIOLI M,REGAZZONI L,et al.Profiling histidine dipeptides in plasma and urine after ingesting beef,chicken or chicken broth in humans[J].Amino Acids,2010,38(3):847–858.

[41] MANNION A F,JAKEMAN P M,DUNNETT M,et al.Carnosine and anserine concentrations in the quadriceps femoris muscle of healthy humans[J].European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology,1992,64(1):47–50.

[42] 韩婷婷,曹建民,谭海,等.补充 β-丙氨酸对间歇运动大鼠肌肉能量代谢生物学指标的影响[C]//2014 年中国运动生理生化学术会议论文集.贵阳:贵州省体育科学学会,2014.

[43] RUSS D W,ACKSEL C,BOYD I M,et al.Dietary HMB and β-alanine co-supplementation does not improve in situ muscle function in sedentary,aged male rats[J].Applied Physiology,Nutrition,and Metabolism,2015,40(12):1294–1301.

[44] WU H C, SHIAU C Y,CHEN H M.Antioxidant activities of carnosine,anserine,some free amino acids and their combination[J].Journal of Food and Drug Analysis,2003,11(2):148–153.

[45] SMITH A E,STOUT J R,KENDALL K L,et al.Exercise-induced oxidative stress:the effects of β-alanine supplementation in women[J].Amino Acids,2012,43(1):77–90.

[46] HU X X,HONGTRAKUL K,JI C,et al.Effect of carnosine on growth performance,carcass characteristics,meat quality and oxidative stability in broiler chickens[J].Journal of Poultry Science,2009,46(4):296–302.

[47] JONG C J,ITO T,MOZAFFARI M,et al. Effect of β-alanine treatment on mitochondrial taurine level and 5-taurinomethyluridine content[J].Journal of Biomedical Science,2010,17(1):325-332.

[48] 刘虹,刘贺,王新,等.牛磺酸跨膜转运的研究进展[J].中国饲料,2007(14):8–11.

[49] MATHERS D A,MCCARTHY S M,COOKE J E,et al.Effects of the β-amino acid antagonist TAG on thalamocortical inhibition[J].Neuropharmacology,2009,56(8):1097–1105.

[50] JUGE N,OMOTE H,MORIYAMA Y.Vesicular GABA transporter (VGAT) transports β-alanine[J].Journal of Neurochemistry,2013,127(4):482–486.

Physiological Function and Its Application in Animal Feeding of β-Alanine

QI Bo　WU Shugeng　WANG Jing　QI Guanghai　ZHANG Haijun*

(*Feed Research Institute*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Laboratory of Feed Biotechnology of Ministry of Agriculture*, *National Engineering Research Center of Biological Feed*, *Beijing* 100081, *China*)

Abstract: β-Alanine, a precursor involved in the formation of carnosine and anserine but not involved in the biosynthesis of protein, has been widely used as a nutritional supplement to strength muscle endurance in sport medicine field nowadays. It was reported that β-alanine can increase the growth performance, improve the meat quality through regulating the growth rate of muscle and content of muscle-derived active peptide. This paper reviewed the source and metabolism, physiological functions and the application in animal feeding of β-alanine in order to provide theoretical basis for its regulation of animal nutrition and application in animal feeding field.

Key words: β-alanine; muscle-derived active peptide; physiological function; animal production

*Corresponding author, associate professor, E-mail: fowlfeed@163.com (责任编辑　李慧英)